

# 自由活塞膨胀机-直线发电机流体仿真与运动分析\*

张凯 彭宝营 王鹏家 童亮

(北京信息科技大学,北京 100192)

**【摘要】**为提高自由活塞膨胀机-直线发电机装置的集成度,使用计算流体力学方法,运用动网格技术,分析了气缸内气体的运动情况和活塞的运动特性,并利用正交试验分析了气缸结构参数对活塞运动特性的影响程度。结果表明:气体流经进、排气通口处,气体压力和流速的变化较为明显;气缸通口孔径对活塞速度、位移的影响最大;进气时间、活塞质量、气缸直径对活塞的位移、速度也存在不同程度的影响。

**关键词:**自由活塞膨胀机-直线发电机 气缸 流体仿真 运动特性

**中图分类号:**TH138.51 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20221016

## Fluid Simulation and Motion Analysis of Free Piston Expander-Linear Generator

Zhang Kai, Peng Baoying, Wang Pengjia, Tong Liang

(Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192)

**【Abstract】**In order to improve the integration of free piston expander-linear generator, the motion of air in cylinder and the motion characteristics of piston were analyzed by using computational fluid dynamics method and dynamic grid technique, and the influence of cylinder structural parameters on the motion characteristics of piston was analyzed by orthogonal test. The results show that the air pressure and velocity change obviously when the air flows through the inlet and outlet. Cylinder orifice aperture has the greatest influence on piston velocity and displacement. Intake time, piston mass and cylinder diameter also have different influences on piston displacement and velocity.

**Key words:** Free piston expander-linear generator, Cylinder, Fluid simulation, Kinetic characteristic

**【引用格式】**张凯,彭宝营,王鹏家,等.自由活塞膨胀机-直线发电机流体仿真与运动分析[J].汽车技术,2023(12):40-46.

ZHANG K, PENG B Y, WANG P J, et al. Fluid Simulation and Motion Analysis of Free Piston Expander-Linear Generator [J]. Automobile Technology, 2023(12): 40-46.

### 1 前言

自由活塞膨胀机-直线发电机(Free Piston Expander-Linear Generator, FPE-LG)作为一种新型汽车余热回收装置,通过对汽车尾气进行回收利用,减少污染物排放量,提高能源利用效率。优化装置气缸部分尺寸,是提高装置集成度,使其顺利应用于汽车领域的一个重要方面,气缸内活塞的运动特性也受到诸多学者的关注。Peng等人研究了FPE-LG耦合驱动电机时活塞的运动特性<sup>[1]</sup>。赵腾龙等人基于FPE-LG试验台架研究了外接负载电阻对活塞运动特性的影响<sup>[2]</sup>。张红光等人研究了不同外部工况(驱动压力、工作频率、外接负载等)对活

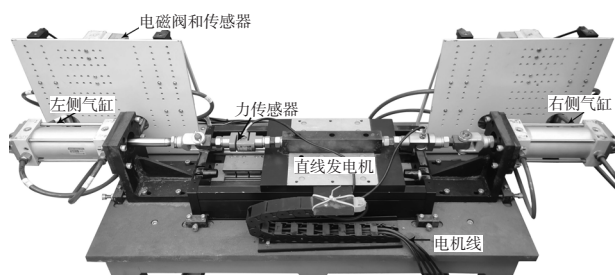
塞运动特性的影响<sup>[3-5]</sup>。Hou等人也研究了外部负载电阻对活塞运动特性的影响<sup>[6]</sup>。Mhadi A. Ismael等人开发自由活塞线性发电机试验台,研究了不同进气压力和阀门开启时间下的活塞运动<sup>[7]</sup>。此外,张红光等人通过仿真软件搭建了系统仿真模型,基于该模型研究了活塞初始位移、活塞-动子连杆质量以及工作频率等对活塞运动特性的影响<sup>[8]</sup>。Xu等人研究了不同气门正时对系统运动特性的影响,并通过仿真模型分析了活塞的运动特性,以及高频高压工况下系统的性能<sup>[9-11]</sup>。Li等人利用计算流体力学方法分析了不同工作频率对活塞位移的影响,以及进、排气过程中气体的流动情况<sup>[12]</sup>。李顿等人以振动特性和输出电压变化作为评价指标,研究

\*基金项目:北京市自然科学基金项目(3192014);北京市科技计划项目(Z191100002019004);北京市教委科技计划一般项目(KM202011232012)。

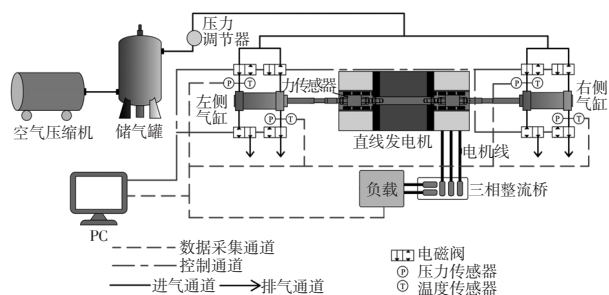
了不同工况对 FPE-LG 系统平稳性的影响<sup>[13]</sup>。可以看出,对于活塞运动特性的研究主要集中在改变外部工况和外接负载方面,然而为了提高装置的集成度,气缸自身结构对活塞运动特性的影响同样需要考虑。本文使用 Fluent 软件,采用动网格技术对气缸进行仿真,得到气缸内气体压力和流速的分布情况,探究活塞质量、进排气通道直径、气缸直径以及进气时间对活塞运动特性的影响。

## 2 FPE-LG 装置

如图 1a 所示, FPE-LG 试验台由左右两侧气缸、直线发电机、电磁阀以及各种传感器等组成。图 1b 所示为试验过程原理,空气压缩机产生压缩气体,储气罐起稳压作用,经压力调节阀调至适当压力后,气体进入气缸内膨胀做功,通过电磁阀控制进排气通道的开闭,实现活塞连杆的往复运动,带动直线发电机定子往复运动切割磁感线发电,从而实现将气体能量转化为电能。



(a) 试验装置



(b) 试验原理

图1 FPE-LG 试验装置原理

## 3 仿真过程

### 3.1 仿真模型的建立

试验装置中气缸型号为 SMC MDBB 63-100nz, 规格如表 1 所示。使用 SolidWorks 对气缸进行三维建模, 并对模型进行合理简化, 去除活塞杆, 活塞初始位置为上止点, 如图 2 所示。

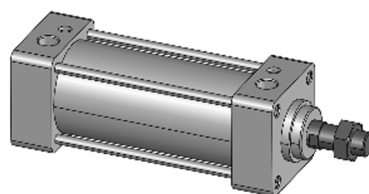
### 3.2 网格划分

在 Mash 中进行网格划分: 将活塞运动的区域设置为六面体网格, 并选择生成映射网格 (Mapped Mesh), 此

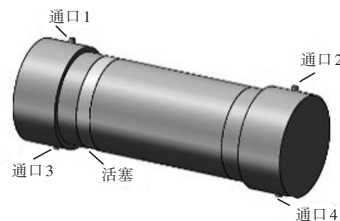
时网格包含的单元数量更少, 计算速度更快; 其余区域默认生成四面体网格。网格尺寸为 0.005 m, 网格节点数量为 16 573 个, 网格单元数量为 39 773 个, 网格划分结果如图 3 所示。

表1 气缸规格

项目	规格	项目	规格
缸径/mm	63	使用流体	空气
行程/mm	100	耐压试验压力/MPa	1.5
通口孔径/mm	4	最高使用压力/MPa	1.0
动作方式	单杆双作用	最低使用压力/MPa	0.05



(a) 气缸三维模型



(b) 气缸简化模型

图2 气缸三维模型和简化模型

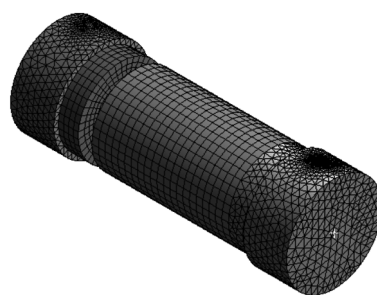


图3 网格划分结果

### 3.3 仿真条件设置

开启能量方程, 选择 Realizable  $k$ -epsilon 粘性模型, 壁面函数选择可缩放壁面函数 (Scalable Wall Functions), 计算设置为瞬态计算。流体选择理想气体, 初始进气压力设为 0.3 MPa。在动网格中对 6 个自由度进行设置, 活塞运动方向选择沿  $X$  方向平移。活塞质量为 0.27 kg, 忽略气缸与活塞间的摩擦。

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 仿真结果

#### 4.1.1 不同阶段气体压力、速度云图

气体在气缸内共经历 3 个阶段, 即进气阶段、膨胀

阶段和排气阶段。进气阶段,通口1、通口4开启,通口2、通口3关闭,气体进入左侧气腔,活塞在气体的推动下从左向右移动。一段时间后,关闭通口1,气体在气缸内膨胀,继续推动活塞向右运动,此阶段为膨胀阶段。当活塞到达右侧极限位置时,通口2、通口3开启,通口1、通口4关闭,活塞从右向左运动,左侧气腔内的气体排出气缸,此阶段为排气阶段。

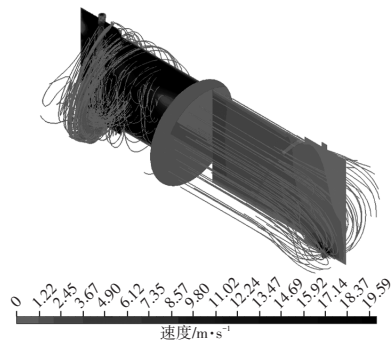
图4所示为仿真过程中气缸内气体在通口截面处不同阶段的压力云图,可以看出,进气阶段随着气体流入左侧进气腔,活塞从左向右移动,进气腔压力逐渐增大。由于活塞向右移动,活塞右侧腔体体积减小,气体受到挤压后并不能及时由排气门排出,导致右侧腔内气体压力也逐渐增大。膨胀阶段,气体停止流入气缸,气缸内的气体继续膨胀,推动活塞继续向右运动。随着活塞左侧腔体体积逐渐增大,压力逐渐降低。活塞左、右两侧压力差使得活塞进行减速运动,直到速度减为0。排气阶段,左侧腔体内气体受到挤压未能及时排出气缸,排气阶段结束时左侧腔体内的压力增大,未排出气体进入下一循环继续利用。



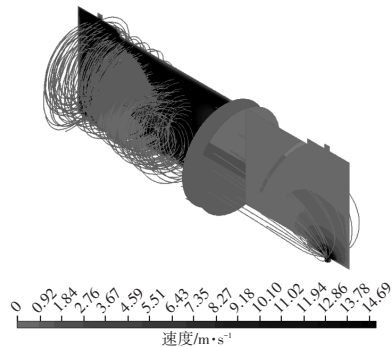
(d)排气阶段2

图4 气体压力云图

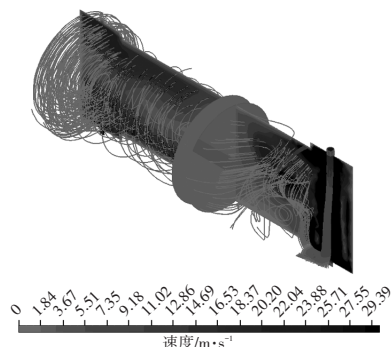
图5所示为仿真过程中气缸内活塞左、右两侧气体的流速,可以看出,在进气阶段和膨胀阶段,进气腔侧体内,气体由进气通孔流入气缸,受气缸约束形成涡流,排气侧腔体内气体较少,气体沿气缸轴线均匀流出气缸。处于排气阶段时,由于活塞左、右两侧腔体内均已有气体,气体间相互作用,所以气体流线规律不再明显,形成紊流现象。



(a)进气阶段



(b)膨胀阶段



(c)排气阶段1



(a)进气阶段



(b)膨胀阶段



(c)排气阶段1

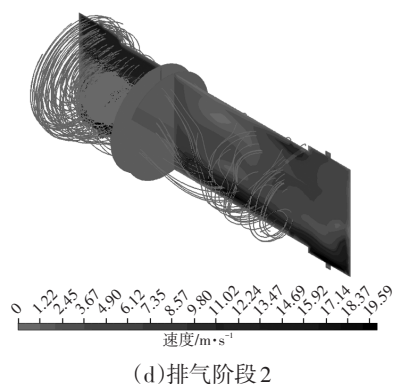


图5 气体流线和流速云图

#### 4.1.2 仿真结果验证

为验证仿真结果的合理性,对比进气压力为0.3 MPa时,试验与仿真所得的活塞位移曲线,如图6所示。活塞稳定运行时,进气阶段活塞由左侧极限位置开始运动,进气一定时间后,关闭进气通道,活塞继续向右运动,直至活塞速度为0。此时,活塞左侧腔体进入排气阶段,活塞从右向左运动。由于忽略了活塞与气缸之间的摩擦,以及直线电机运行时所产生的电磁力,仿真结果与试验结果相比,活塞往复运动的周期和行程存在一定偏差,但是,活塞稳定运动后,其运动规律较为一致,均进行类正弦运动,因此,可用来进行定性分析。

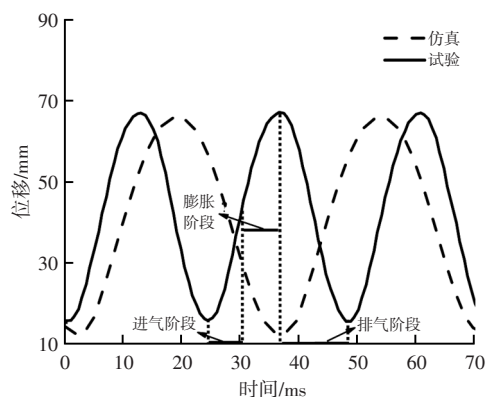
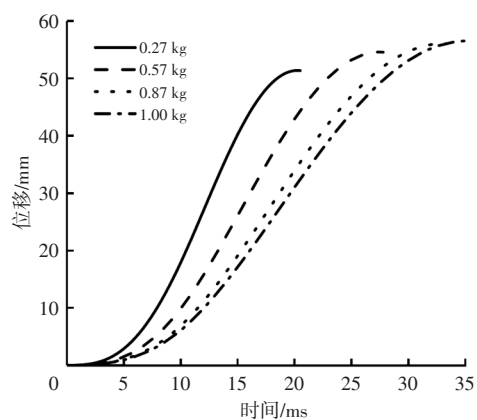


图6 活塞位移曲线

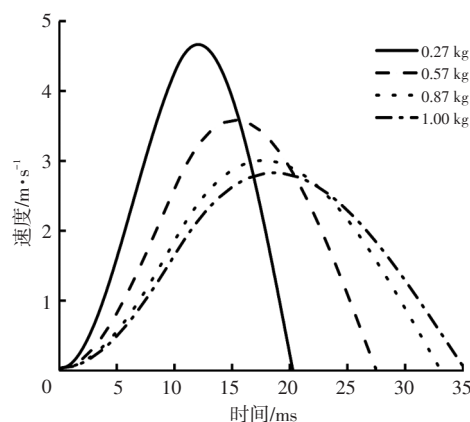
#### 4.2 活塞质量对运动特性的影响

图7所示为进、排气通口孔径为4 mm,气缸直径为63 mm,进气时间为10 ms时,活塞质量分别为0.27 kg、0.57 kg、0.87 kg和1.00 kg条件下活塞的位移、速度曲线。由图7a可以看出,气体刚进入进气腔时,活塞位移变化很小,这是由于气体未能及时充满进气腔。当气体充满进气腔后,进、排气腔产生压力差,推动活塞从初始位置向右运动,活塞速度逐渐增大。进气腔体积逐渐增大,腔内压力逐渐减小,排气腔体积逐渐减小,腔内压力逐渐增大,当活塞左、右两侧气体压力相同时,活塞加速

度为0,此时速度达到最大。随后,活塞右侧气体压力较活塞左侧大,活塞进行减速运动,直到速度减为0。活塞的位移随活塞质量的增加呈现先增加后趋于平缓的趋势,当活塞质量增加到0.87 kg时,继续增加活塞质量对活塞位移的影响较小。由图7b可知,活塞的峰值速度随活塞质量的增加而减小,当活塞质量增加到0.87 kg时,继续增加活塞质量,活塞峰值速度减小的幅度变小。



(a) 位移



(b) 速度

图7 不同活塞质量下活塞的位移、速度曲线

#### 4.3 进、排气通口孔径对活塞运动特性的影响

图8所示为活塞质量为0.27 kg,气缸直径为63 mm,进气时间为10 ms时,进、排气通口孔径分别为4 mm、5 mm、6 mm和7 mm条件下的活塞位移、速度曲线。由图8a可以看出,随着通口孔径的增加,活塞位移逐渐增大并趋于稳定;由图8b可以看出,活塞的峰值速度随着通口孔径的增加先增大后微弱减小。随着通口孔径的增加,10 ms内进入气缸内的气体增多,关闭进气通道的瞬间,活塞的速度更大。气体膨胀阶段,随着排气通口孔径的增加,气体由排气腔排出更快,活塞速度减至0所需的时间更短,通口孔径为6 mm时,活塞速度最先下降为0。通口孔径为7 mm时,

活塞位移最大,达91 mm,通口孔径为6 mm时,活塞峰值速度最大,达8.7 m/s,且活塞速度降为0约需19 ms。

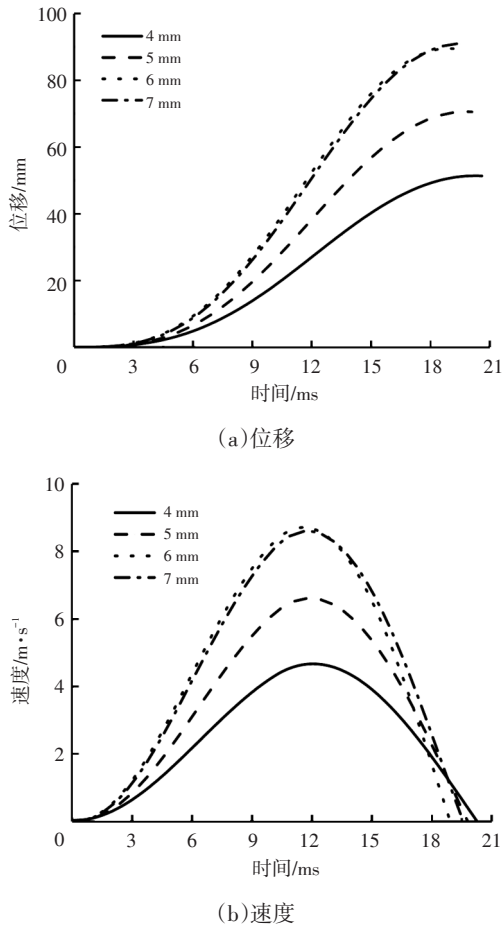


图8 不同通口孔径下活塞的位移、速度曲线

#### 4.4 气缸直径对活塞运动特性的影响

图9所示为进、排气通口孔径为4 mm,活塞质量为0.27 kg,进气时间为10 ms时,气缸直径分别为63 mm、67 mm、71 mm、75 mm和79 mm条件下活塞的位移、速度曲线。可以看出,随着气缸直径的增加,活塞位移、速度均逐渐减小。这是因为进气时间一定,进入气缸内的气体量相同,气缸直径越大,导致进入气缸内的气体压力越小,对活塞的驱动能力越弱。所以,在进气压力、进气时间一定时,选用较小的缸径可获得较高的活塞运动速度。

#### 4.5 进气时间对活塞运动特性的影响

图10所示为通口孔径为4 mm,气缸直径为79 mm,活塞质量为0.27 kg时,进气时间分别为10 ms、12 ms、15 ms、18 ms条件下活塞的位移、速度随时间变化曲线。当进气时间由10 ms延长至15 ms,活塞的位移增大比较明显;当进气时间进一步延长到18 ms时,活塞位移增大的幅度较小。由图10b可以看出,随着进气时间的延长,活塞的峰值速度变化并不明显。

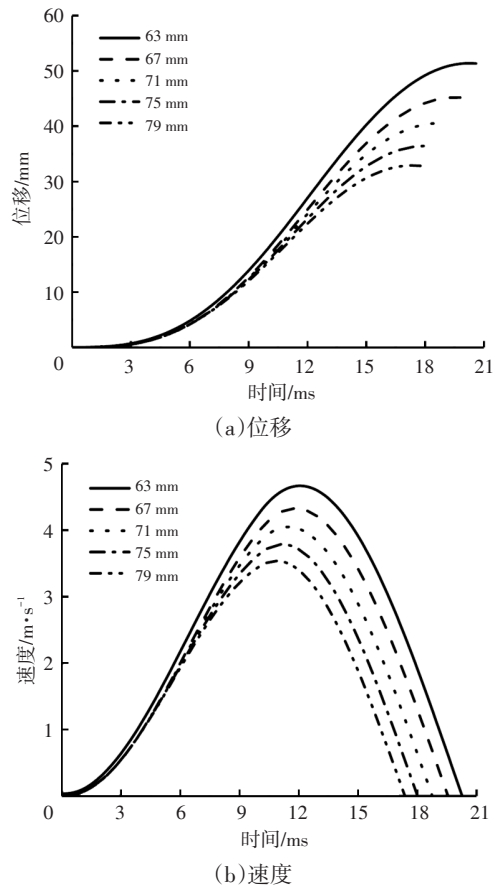


图9 不同缸径下活塞的位移、速度曲线

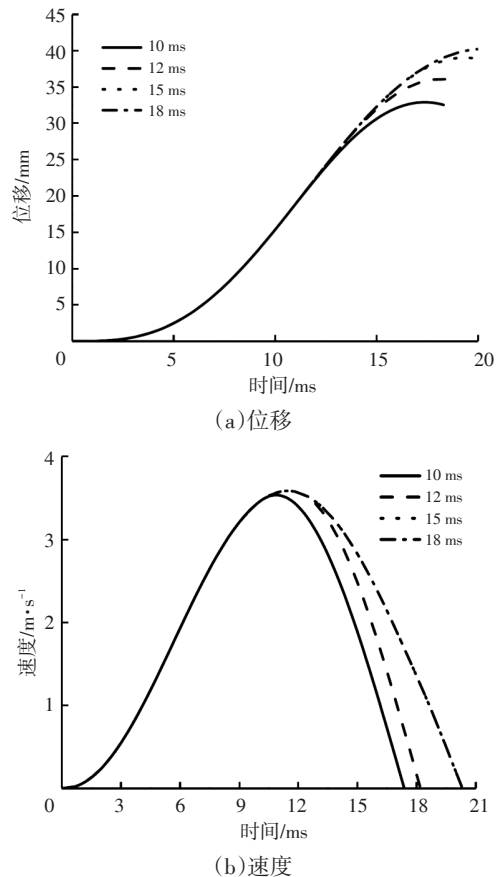


图10 不同进气时间下活塞的位移、速度曲线

#### 4.6 正交试验结果分析

由以上分析可以看出,活塞质量、通口孔径和缸径对活塞的运动特性有着不同程度的影响。使用正交试验的方法,通过极差 $R$ 分析,得到以上3种因素对于活塞运动特性的影响程度。如表2所示,因素A、B、C分别对应活塞质量、通口孔径和缸径,并各选取3个水平进行正交试验。正交试验方案设计和试验结果如表3所示,根据试验结果进行极差分析,其中 $k_i$ 为水平 $i$ 条件下,对应因素的试验结果之和的平均值, $R$ 为某因素下 $k_i$ 的最大值与最小值之差,其值越大表明该因素对试验结果的影响程度越大,如表4所示:通口孔径对于活塞位移的影响程度最大,其次为缸径,活塞质量对活塞位移的影响最小;通口孔径对活塞峰值速度的影响程度最大,其次为活塞质量,缸径对活塞峰值速度的影响最小。

表2 三因素及相应的水平值

水平	因素A (活塞质量)/kg	因素B (通口孔径)/mm	因素C (缸径)/mm
1	0.27	4	63
2	0.57	5	67
3	0.87	6	71

表3 正交试验方案及试验结果

序号	因素A	因素B	因素C	位移/mm	峰值速度/ $m \cdot s^{-1}$
1	A1	B1	C1	51.383	4.667
2	A1	B2	C2	63.936	6.232
3	A1	B3	C3	74.795	7.762
4	A2	B1	C2	48.119	3.353
5	A2	B2	C3	61.992	4.624
6	A2	B3	C1	96.950	6.759
7	A3	B1	C3	44.543	2.688
8	A3	B2	C1	77.803	4.288
9	A3	B3	C2	90.955	5.469

表4 极差分析结果

参数	对于位移 $s$ 的影响/mm			对于峰值速度 $v_{peak}$ 的影响/ $m \cdot s^{-1}$		
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
$k_1$	63.371	48.015	75.378	6.220	3.569	5.238
$k_2$	69.020	67.910	67.670	4.912	5.048	5.018
$k_3$	71.100	87.567	60.443	4.148	6.663	5.025
$R$	7.729	39.552	14.935	2.072	3.094	0.220

## 5 结束语

为了提高自由活塞膨胀机-直线发电机的集成度,使得在缸结构更加紧凑的情况下,活塞获得更高的速度,本文分析了缸内气体的流动状态,研究了缸

结构以及进气时间对于活塞运动特性的影响,结论如下:

a. 气体流经进、排气通口处,气体压力、速度较大;缸内气体压力有所降低、气体流速比较稳定。

b. 随活塞质量的增加,活塞位移先增加后趋于稳定;活塞速度先减小,后趋于稳定。随缸径的增加,活塞位移、速度均减小。

c. 随通口孔径、进气时间的增加,活塞位移、速度均先增加后趋于稳定。

d. 为了在行程较小时获得较大的活塞速度,可在缸理论行程范围内首先考虑适当增大气门通口孔径、其次降低活塞质量,最后减小缸径。

### 参 考 文 献

- [1] PENG B Y, TONG L, GUO C D, et al. Experimental Research and Performance Analysis of a Free Piston Expander - Linear Generator Coupled with a Driving Motor [J]. Energy Reports, 2021, 7: 1349-1359.
- [2] 赵腾龙, 张红光, 侯孝臣, 等. 外接负载对ORC余热回收系统中自由活塞膨胀机-直线发电机的性能影响研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 237-243.  
ZHAO T L, ZHANG H G, HOU X C, et al. Effect of External Load on Performance of Free-Piston Expander-Linear Generator in ORC Waste Heat Recovery System[J]. Chinese Journal of Solar Energy, 2020, 41(7): 237-243.
- [3] 张红光, 张梦茹, 侯孝臣, 等. 自由活塞膨胀机-直线发电机的性能研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 86-94.  
ZHANG H G, ZHANG M R, HOU X C, et al. Study on the Performance of Free-Piston Expander and Linear Generator [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 86-94.
- [4] 张红光, 李健, 田亚明, 等. 新型自由活塞膨胀机-直线发电机的性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(1): 109-114.  
ZHANG H G, LI J, TIAN Y M, et al. Performance Analysis of a New Free-Piston Expander and Linear Generator[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(1): 109-114.
- [5] 张红光, 于飞, 李高胜, 等. 压缩空气驱动自由活塞膨胀机-直线发电机特性试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 377-383.  
ZHANG H G, YU F, LI G S, et al. Characteristics Test of Free-Piston Expander-Linear Generator Driven by Compressed Air[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 377-383.
- [6] HOU X C, ZHANG H G, XU Y H, et al. External Load Resistance Effect on the Free Piston Expander-Linear

- Generator for Organic Rankine Cycle Waste Heat Recovery System[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1252-1261.
- [7] ISMAEL M A, AZIZ A R A, ZAINAL A E Z, et al. Investigation on Free-Piston Motion and Power Generation of A Dual-Piston Air-Driven Expander Linear Generator[J]. Energy Reports, 2021, 7: 2388-2397.
- [8] 张红光, 常莹, 李高胜, 等. 自由活塞膨胀机-直线发电机集成系统动力特性研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(3): 440-446.
- ZHANG H G, CHANG Y, LI G S, et al. Dynamic Characteristics of Integrated System of Free-Piston Expander and Linear Generator[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(3): 440-446.
- [9] XU Y H, TONG L, ZHANG Y H, et al. Experimental Investigation of a Free Piston Expander-Linear Generator with Different Valve Timings[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 555-565.
- [10] XU Y H, TONG L, ZHANG H G, et al. Experimental and Simulation Study of a Free Piston Expander-Linear Generator for Small-Scale Organic Rankine Cycle[J]. Energy, 2018, 161: 776-791.
- [11] 许永红, 童亮, 张红光, 等. 自由活塞膨胀机-直线发电机试验与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7391-7399+7465.
- XU Y H, TONG L, ZHANG H G, et al. Experimental and Simulation Study of a Free Piston Expander-Linear Generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7391-7399+7465.
- [12] LI G S, ZHANG H G, YANG F B, et al. Preliminary Development of a Free Piston Expander-Linear Generator for Small-Scale Organic Rankine Cycle (ORC) Waste Heat Recovery System[J]. Energies, 2016, 9(4).
- [13] 李顿, 彭宝营. 自由活塞膨胀机-直线发电机平稳性研究[J]. 汽车技术, 2022(12): 23-28.
- LI D, PENG B Y. Research on Stability of Free Piston Expander and Linear Generator[J]. Automobile Technology, 2022(12): 23-28.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2022年11月17日。

## 《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主,并兼有理论研究内容,是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下,把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势,努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域,新能源汽车和互联智能汽车技术领域,大力吸收优质稿源,为广大科研和工程技术人员服务,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求:

- 1.文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内;
- 2.请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
- 3.文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处;
- 4.文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
- 5.来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
- 6.请勿一稿多投;

7.本刊使用网站投稿,请先登录网站注册成功后投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”,网址:<http://qcjs.cbpt.cnki.net>。

《汽车技术》杂志编辑部

汽车技术